

dr. Gorazd NOVAK*

dr. Boštjan GREGORC**

Jure MLAČNIK*

HE ZLATOLIČJE: PREDLOG PRILAGODITVE OBRATOVANJA NA PODLAGI RAZISKAVE OBRATOVALNIH VALOV

POVZETEK

V letu 2013 je Hidroinštitut izvedel obsežno raziskavo obratovalnih valov v dovodnem kanalu HE Zlatoličje. Izvedena sta bila dva celodnevna terenska preizkusa, s katerima so bile izmerjene stacionarne in dinamične hidravlične razmere v dovodnem kanalu. Tako pridobljene meritve so bile uporabljene za umerjanje enodimenzijskega numeričnega hidravličnega modela, izvedenega z orodjem HEC-RAS. V prispevku so predstavljeni nekateri zanimivejši rezultati simulacij obratovalnih valov, na podlagi katerih je bil podan predlog za optimizacijo obratovanja elektrarne z vidika varnosti objekta in izkoristka energetskega potenciala.

1. UVOD

Drava se v Mariboru zliva v derivacijski kanal ob jezcu Melje in po dovodnem kanalu priteče do HE Zlatoličje, ki ima dve turbini in skupno moč 126 MW. Leta 2013 je bila izvedena raziskava obratovalnih valov z namenom določitve ukrepov za varno obratovanje dovodnega kanala po povečanju instalirane moči. S hidravličnim 1D modelom, ki je bil natančno umerjen in verificiran na meritve s terena, je bilo s sorazmerno preprostimi simulacijami možno določiti optimalen način obratovanja HE, ki bo vplival na spremembo obratovalnega pravilnika obravnavane HE.

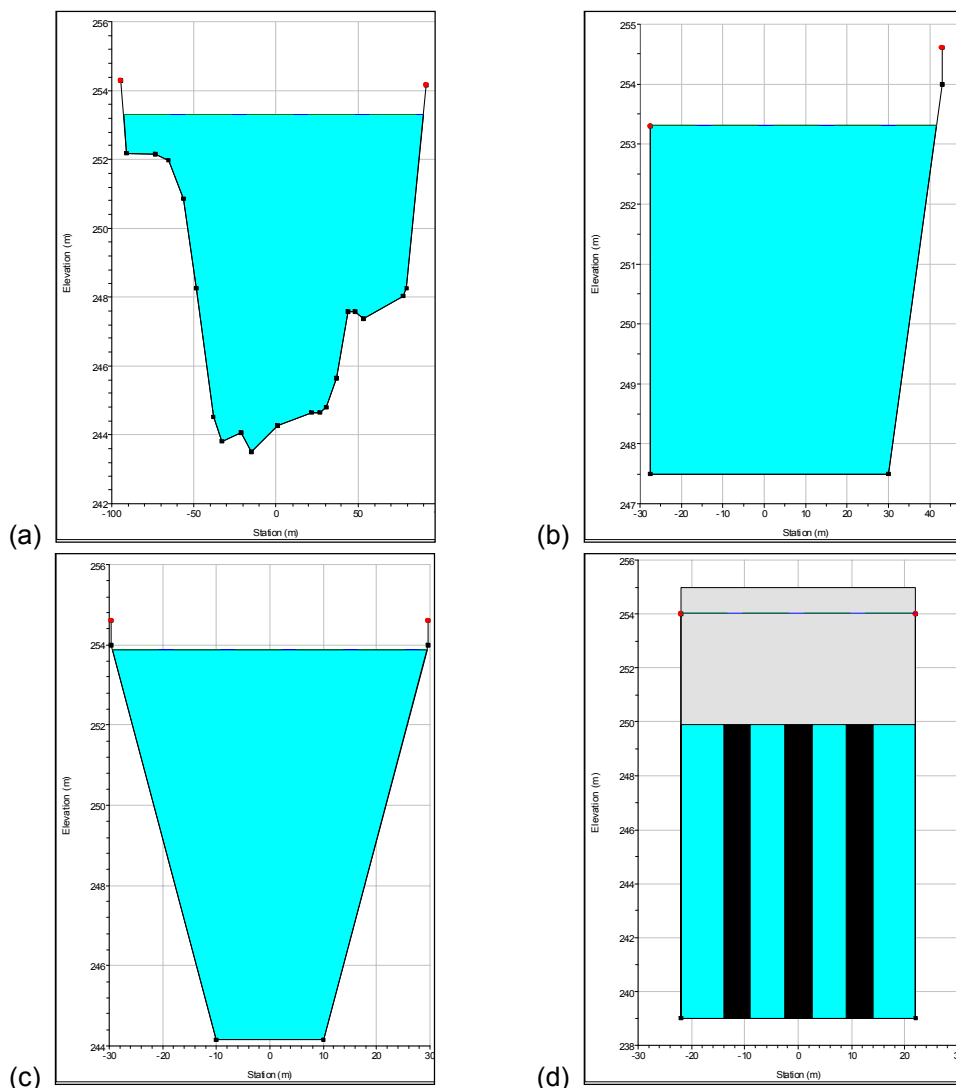
Obravnavani kanal trapeznega prečnega prereza ima 17 km dolgo ukrivljeno os, večinoma je zelo položen (padec dna $I = 0,00027$), šele 250 m gorvodno od vtoka HE se začne razširitev in poglobitev (na tem odseku $I = 0,017$). Ima betonsko oblogo in je v nasipu. Gorvodni in dolvodni odsek kanala s pripadajočima robnima pogojema Z_{Me} (kota gladine v Melju) in Q_{ZL} (pretok skozi HE Zlatoličje) sta prikazana na sliki 1.



Slika 1: Tloris kanala – gorvodni odsek (a) in dolvodni odsek (b): (1) Drava, (2) jez Melje, (3) vtok v kanal, (4) bočni preliv na levem bregu kanala, (5) kanal, (6) razširitev in poglobitev kanala, (7) vtok HE Zlatoličje. Vir fotografij: www.geopedia.si.

* dr. Gorazd NOVAK, univ. dipl. inž. gradb., Hidroinštitut, Hajdrihova 28, Ljubljana, * Jure MLAČNIK, univ. dipl. inž. gradb., Hidroinštitut, Hajdrihova 28, Ljubljana** dr. Boštjan GREGORC, univ. dipl. inž. str., Dravske elektrarne Maribor d.o.o., Obrežna 170, Maribor

Značilni računski prečni prerezi numeričnega modela so prikazani na sliki 2.



Slika 2: Računski prečni prerezi numeričnega modela: (a) zgornji rob modela (Drava približno 150 m gorvodno od jezua Melje), (b) bočni preliv, (c) tipični trapezni prerez kanala, (d) spodnji rob modela (tik gorvodno od turbinskega vtoka).

Raziskava je obsegala dva celodnevna terenska preizkusa s posebnim obratovanjem HE in numerične simulacije z uveljavljenim 1D hidravličnim modelom HEC-RAS 4.1. Po vzpostavitvi, umerjanju in verifikaciji modela je bilo s simulacijami določeno naslednje: maksimalni dovoljeni pretok, maksimalna dovoljena denivelacija, ovojnice gladin pri obratovalnih valovih, optimalna normalna zaustavitev, optimalni zagon do maksimalne moči, razmere pri več zaporednih zaustavitvah in zagonih, primerna varnostna višina, vpliv zmanjšanja hrapavosti kanala in optimizacija obratovanja. Članek se osredotoča na določitev optimalnega obratovanja z vidika sprejemljivih obratovalnih valov in varnosti.

2. METODOLOGIJA

Na podlagi analize obstoječih raziskav s fizičnimi modeli, ki so bili na Inštitutu za hidravlične raziskave izvedeni med načrtovanjem obravnavanega objekta (Colarič, 1964a in 1964b) in na podlagi analize različnih numeričnih modelov podobnega problema (Taškov, 2001), je bil izbran numerični model HEC-RAS 4.1. Njegov računski postopek temelji na 1D rešitvi energijske enačbe. Raziskava se je omejila na primere, kjer so manevri agregatov dovolj počasni, da se na obratovalnih valovih ne pojavi sekundarno valovanje. Izračuni obratovalnih valov v dovodnem kanalu so bili izvedeni z modulom za nestalni tok. V geometrijo modela je bilo zajetih cca. 500 prečnih profilov, upoštevajoč tudi dodatne interpolirane.

Za umerjanje in verifikacijo hidravličnega modela sta bila uporabljena dva terenska preizkusa. Pri prvem so bile v dovodnem kanalu vzpostavljene različne stacionarne razmere (zato ga lahko imenujemo stacionarni preizkus), v drugem pa izrazito nestalne razmere (zato ga lahko imenujemo dinamični preizkus). V stacionarnem preizkusu so bili pri različnih konstantnih kotah gladine v Melju (Z_{Me}) vzpostavljeni različni konstantni pretoki v Zlatoličju (Q_{ZL}): $Z_{Me} = 253,0$ do $253,3$ m n.m., $Q_{ZL} = 300$ do 540 m³/s. V dinamičnem preizkusu je bila izvedena dvakratna normalna zaustavitev obeh agregatov (oznaka 2xNZ) in ena hitra zaustavitev obeh agregatov z aktiviranjem razbremenilnikov (oznaka 1xHZ), vsakokrat pri pretoku 400 m³/s, Z_{Me} pa se je gibala med $252,3$ in $253,0$ m n.m. Velja poudariti, da pri HZ sicer nastopi hitra zaustavitev turbin, vendar pa se ob tem aktivirata razbremenilnika z relativno počasnim zapiranjem, tako da sprememba skupnega Q_{ZL} pri HZ dejansko ni hitra. Trajanje izvedbe NZ in HZ je odvisno od pretoka; NZ se izvede v približno 15 minutah, pri HZ pa se razbremenilnika odpreta v približno 20 minutah.

Za načrtovanje izvedbe obeh terenskih preizkusov so bile izvedene preliminarne 1D simulacije, upoštevane so bile izkušnje iz podobnih preizkusov (Mlačnik in Zakrajšek, 2004). Med obema preizkusoma je potekalo kontinuirno merjenje vseh relevantnih parametrov; kot vhodni podatki numeričnega modela so bili uporabljeni turbinski pretoki in kote gladin vzdolž kanala (ponekod izmerjene na obeh bregovih). Vhodni podatki in rezultati numeričnega modela so bili dani na minuto.

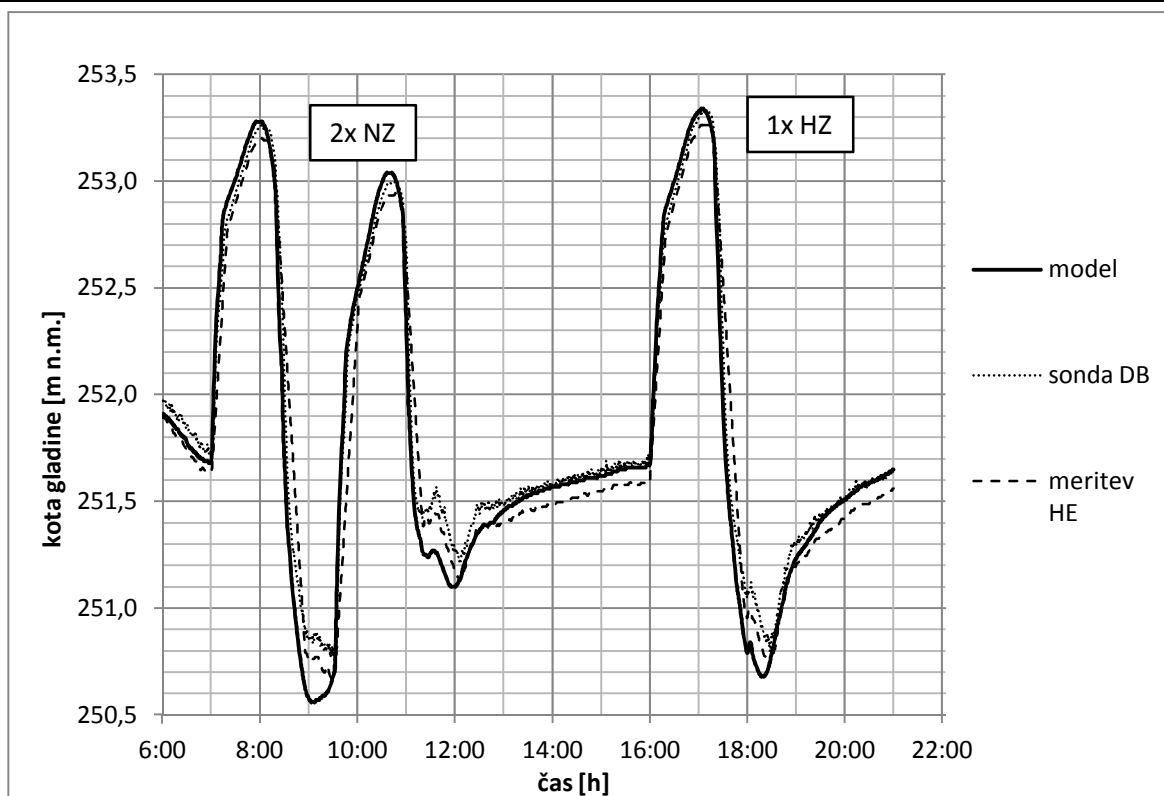
3. IZRAČUNI

Robna pogoja numeričnega modela sta bila: gorvodna konstantna kota Z_{Me} in dolvodni (nestalni turbinski) pretok Q_{ZL} . Začetna robna pogoja sta bila dotok v kanal in kota Z_{ZL} , ki velja za stalni tok. 3D vpliv vtočnih rešetk HE Zlatoličje je bil v 1D modeliran s povečano širino stebrov in večjimi koeficienti hrapavosti in kontrakcije toka.

Kote gladin, izračunane z umerjenim in verificiranim modelom so bile znotraj dogovorjene tolerance ± 10 cm glede na meritve (slika 3). Izračunani maksimumi so bili do 10 cm višji od izmerjenih, izračunani minimumi pa so bili do 10 cm nižji od izmerjenih, tako da so bile izračunane vrednosti ves čas na t.i. varni strani. Poudariti velja, da raziskava ni obravnavala izredno kratkih zaustavitev agregatov, pri katerih v splošnem lahko nastopijo zelo neugodni sekundarni valovi.

Razpon izvedenih simulacij je bil določen s strani upravljavca HE in je zajemal pretoke od 300 do 560 m³/s, kote Z_{Me} od 252,8 do 253,3 m n.m. ter različne izvedbe zaustavitev in zagonov agregatov. Pri določanju najbolj neugodnih zaporedij zaustavitev in zagonov je bil posamezni primer simuliran v več korakih.

Pozornost je bila namenjena predvsem potencialno najbolj problematičnim razmeram. To so tiste kombinacije robnih pogojev, ki povzročajo najvišje ovojnice in najnižje minimume gladin na vtoku. Prve so lahko nevarne z vidika prelivanja krone nasipa, zadnje pa z vidika nezadostne potopljenosti turbinskega vtoka, ki se lahko odraža v neželenih vrtincih in srkanju zraka. Pri določanju optimalnega obratovanja so bili upoštevani naslednji kriteriji: (1) ovojnica ne sme preseči kote 254,0 m n.m. (krona nasipa je na 254,6 m n.m.), (2) zagotovi naj se zadostno potopljenost vtoka, kota $Z_{ZL} \geq 250,4$ m (zgornji rob vtočnih rešetk je na koti 249,9 m n.m.; za oceno je bila uporabljena enačba Kiviniemi in Makusa, 2009), (3) čim bolj naj se izkoristi energetski potencial, tj. obratovalni valovi naj bodo čim manjši, čim hitreje naj se vzpostavijo stacionarne razmere, gladina naj se ohranja čim višja.



Slika 3: Izmerjene in izračunane gladine na vtoku HE za dinamični preizkus.

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

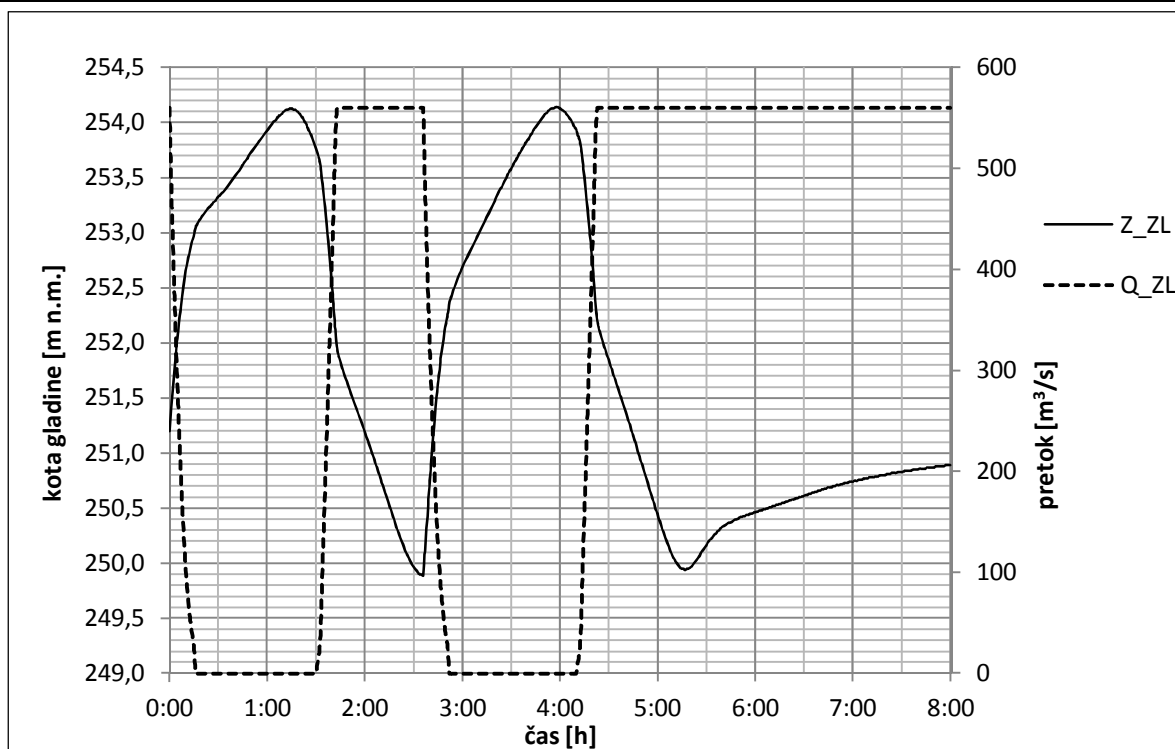
Pri zaustavitvi agregatov (tj. zmanjšanje Q_{ZL}) nastane pozitivni protitočni val, pri zagonu agregatov (tj. povečanje Q_{ZL}) pa negativni protitočni val. Simulacije so pokazale, da so obratovalni valovi pri dani geometriji dovodnega kanala odvisni od naslednjih parametrov: kota (konstantne) gladine na gorvodnem koncu kanala, pretok skozi HE, trajanje zaustavitve oz. zagona agregatov, čas med posameznimi manevri, koeficient hrapavosti n_G .

Izračuni so pokazali, da pri zaustavitvi agregatov pozitivni protitočni val potuje do začetka kanala 35 minut (pri NZ s $400 \text{ m}^3/\text{s}$) do 45 minut (pri NZ s $560 \text{ m}^3/\text{s}$) od začetka zaustavljanja. Torej omenjeni val pri nižjem pretoku in pripadajoči globlji vodi potuje hitreje, kar je skladno s teorijo propagacije valov, hitrost propagacije pa znaša od 6,3 do 8,1 m/s.

V primeru, ko po NZ obeh agregatov sledi zagon le-teh, se je kot najbolj neugoden izkazal tisti zagon, ki se začne 1:15 ure (pri $400 \text{ m}^3/\text{s}$) oz. 1:30 ure (pri $560 \text{ m}^3/\text{s}$) po začetku NZ, torej ob času, ko se z gorvodnega konca kanala do pregrade HE vrne negativni sotočni val.

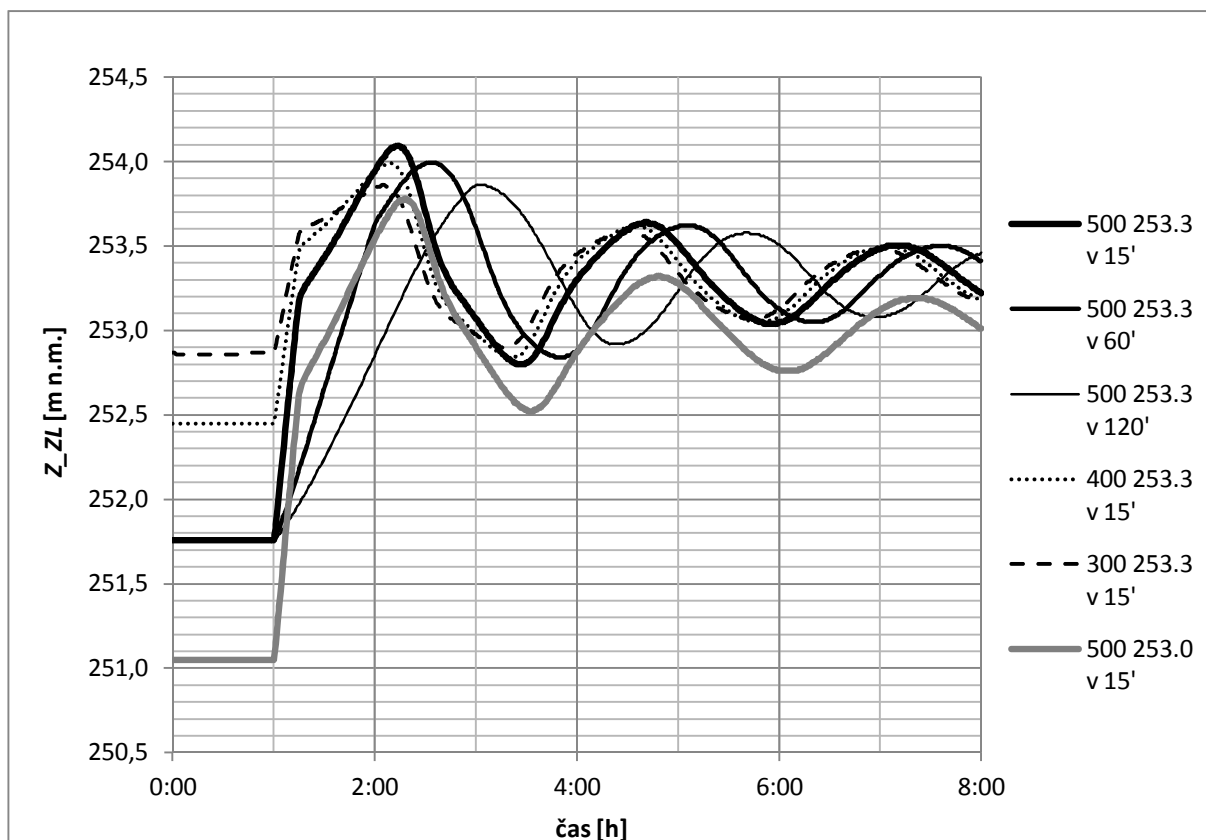
V primeru 2x NZ so obratovalni valovi lahko bolj neugodni kot v primeru 1x NZ ali 1x HZ. Simulacije so pokazale, da je ovojnica pri 1x HZ malenkost nižja kot pri najbolj neugodni 2x NZ. Kot najbolj neugodna druga NZ se je izkazala tista, ki se za vse obravnavane pretoke začne približno 1:05 ure po začetku prvega neugodnega zagona, tj. v času, ko gladina Z_{ZL} doseže svoj prvi minimum. Po analogiji s prvim neugodnim zagonom se je izkazalo, da je najneugodnejši čas za začetek drugega zagona takrat, ko se val, povzročen z drugo NZ, vrne z Melja nazaj do HE Zlatoličje. To pomeni, da je najbolj neugodno, če se drugi zagon na 400 , 500 oz. $560 \text{ m}^3/\text{s}$ začne približno 75, 80, oz. 90 minut po najbolj neugodnem začetku druge normalne zaustavitve. Primer neugodne 2x NZ pri konstantni Z_{Me} je prikazan na sliki 4.

Iz slike 4 je razvidno, da sta prvi in drugi maksimum oz. minimum Z_{ZL} podobna, pri čemer sta oba druga ekstrema malenkost višja od prvih dveh.



Slika 4: Primer najbolj neugodne 2x NZ pri maksimalnem $Q_{ZL} = 560 \text{ m}^3/\text{s}$ in maksimalni $Z_{Me} = 253,3 \text{ m n.m.}$ Prva NZ se začne ob 0:00, prvi zagon ob 1:30, druga NZ ob 2:36 in drugi zagon ob 4:10.

Nadalje se je izkazalo, da je dosežena maksimalna kota sorazmerno malo odvisna od Q_{ZL} in od trajanja NZ, bolj je odvisna od kote Z_{Me} , kar prikazuje slika 5.

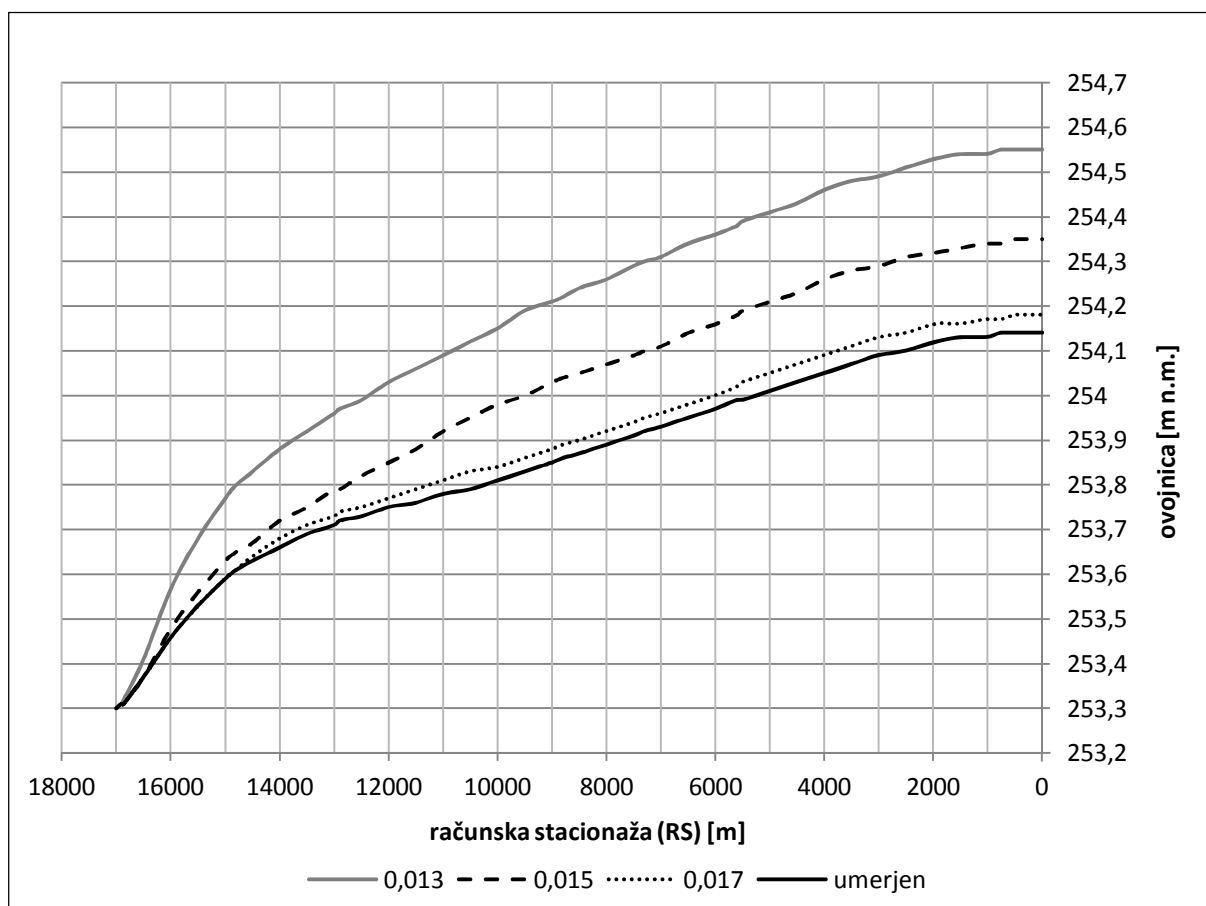


Slika 5: NZ po stacionarnih razmerah, vpliv Q_{ZL} , trajanja NZ in kote Z_{Me} .

Iz slike 5 je razvidno, da so pri isti konstantni Z_{Me} vrhovi Z_{ZL} podobno visoki za različne pretoke in da je graf Z_{ZL} pri nižji Z_{Me} nižji za konstantno vrednost, ki je praktično enaka kot znaša razlika med obema Z_{Me} . Nadalje je razvidno, da je val pri hitrejši zaustavitvi večjega pretoka sicer relativno večji kot pri enako hitri zaustavitvi manjšega pretoka, vendar je pri slednjem kota Z_{ZL} ob začetku NZ višja, tako da je doseženi maksimum Z_{ZL} podoben.

Iz slike 5 je razvidno, da hitrejša zapiranje pretoka povzroči hitrejša naraščanje Z_{ZL} (tj. bolj strm val). Simulacije so pokazale, da gladina seveda najprej najbolj narašča ob HE, nato pa zaradi zelo položnega in dolgega kanala sledi izrazitejša širjenje v smeri gorvodno, tako da se hitrejša zapiranje pretoka (ki pa je še vedno dovolj počasno, da ne pride do sekundarnih valov) odrazi v hitrejšem potovanju bolj strmega vala in ne denimo v višji maksimalni koti Z_{ZL} .

Z vidika proizvodnje je zanimivo tudi vprašanje morebitnih ukrepov za zmanjšanje hrapavosti kanala. Izkazalo se je, da bi kanal z nižjimi vrednostmi Manningovega koeficienta hrapavosti n_G predstavljal možnost večje proizvodnje, vendar bi povzročal višje obratovalne valove. Ovojnice slednjih prikazuje slika 6.



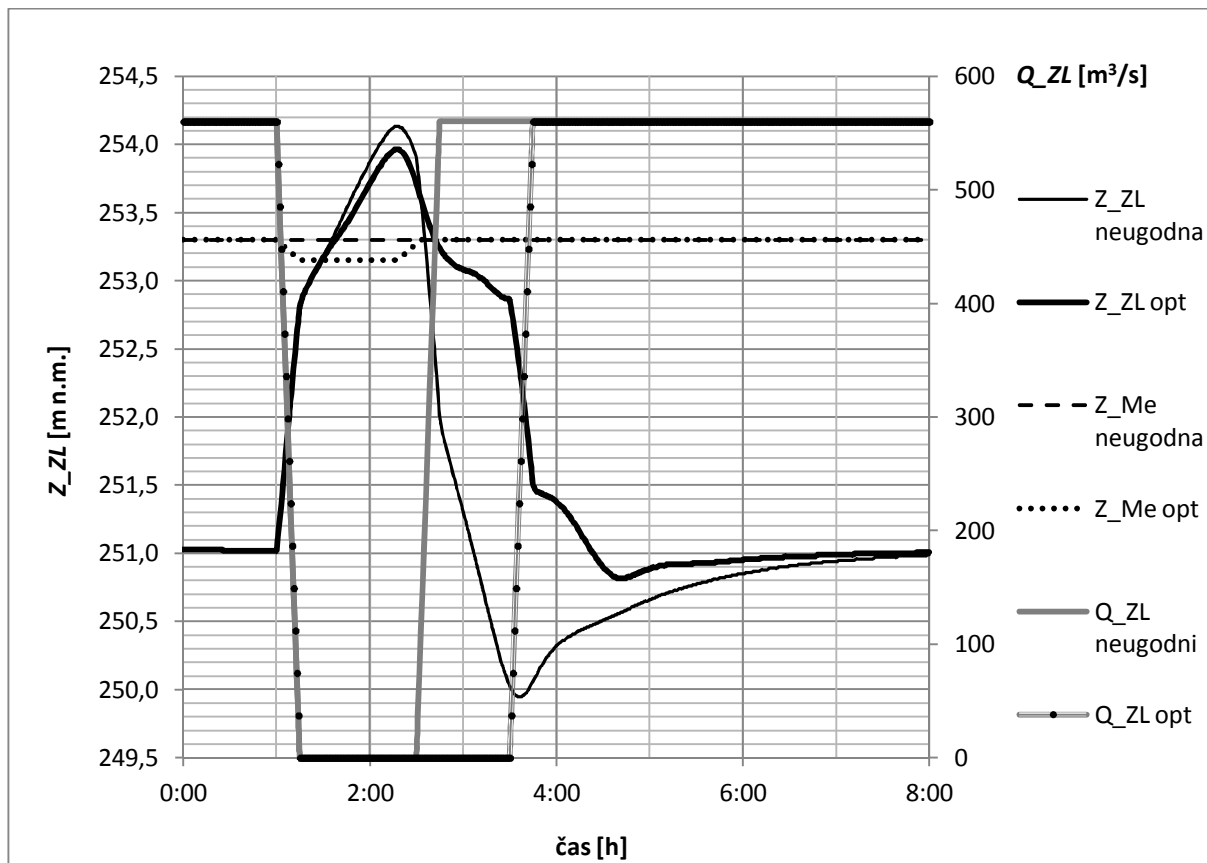
Slika 6: Vpliv znižanja n_G na ovojnice za neugodno 2x NZ 560 m³/s pri $Z_{Me} = 253,3$ m n.m. Pregrada HE je na računski stacionaži RS = 0.

Na sliki 6 so prikazani rezultati simulacij, v katerih je bila vrednost n_G izbrana kot konstantna po celotnem kanalu. Na umerjenem modelu temu seveda ni bilo tako, rezultat slednjega pa služi za primerjavo. Vrednost $n_G = 0,0013$ bi pomenila asfaltno prevleko kanala. (USACE, 2013)

Ker zgolj podaljševanje trajanja NZ ni dovolj učinkovit ukrep za zagotavljanje sprejemljivih obratovalnih valov, je z vidika varnosti, izkoristka energetskega potenciala in sistemske odzivnosti HE smotrnejše, da se zaustavitev agregatov izvede z obstoječe dolгим manevrom, a s hkratnim prilagojenim obratovanjem zapornic na gorvodnem koncu dovodnega kanala.

Za kombinacije Q_{ZL} in Z_{Me} , ki pri zaporedju zaustavitve in zagona agregatov obstoječega trajanja povzročajo najbolj neugodne obratovalne valove, je bilo na podlagi iteracijsko izvedenih simulacij

predlagano naslednje obratovanje jezusa Melje: zniževanje kote Z_{Me} s hitrostjo 1 cm / min se začne istočasno kot NZ in se izvaja toliko časa kot traja NZ. Tako dosežena Z_{Me} se ohranja konstantna, dokler kota Z_{ZL} ne doseže svojega maksimuma. Tedaj se Z_{Me} začne višati s hitrostjo 1 cm / min in traja, dokler ne doseže vrednosti, kakršna je bila Z_{Me} pred začetkom zaustavitve. Nazadnje se začne še zagon, in sicer takrat, ko Z_{ZL} doseže minimum po svojem prvem vrhu. Primer takega obratovanja je prikazan na sliki 7.



Slika 7. Primer optimiziranega obratovanja 1x NZ 560 m³/s.

Iz slike 7 je razvidno, da se s prilagajanjem Z_{Me} in začetka zagona lahko doseže, da Z_{ZL} ne seže previsoko in da se hitreje vzpostavijo stacionarne razmere.

5. ZAKLJUČKI

Raziskava obratovalnih valov, utemeljena na terenskih preizkusih, je pokazala, katere omejitve obratovanja je treba upoštevati, da se zagotovi varnost dovodnega kanala in kako se ob teh omejitvah doseže optimalni izkoristek energetskega potenciala. Za HE Zlatoličje je bilo ugotovljeno naslednje: (1) primer 2x NZ z najbolj neugodnim časovnim intervalom je izrazito bolj neugoden kot zvezna 3x NZ; (2) hitrejša zaustavitev večjega pretoka sicer povzroči relativno večji in strmejši val kot počasnejša zaustavitev manjšega pretoka, vendar je pri slednjem izhodiščna kota višja, tako da je dosežena maksimalna kota približno enaka. Bolj kot pretok in trajanje manevra vpliva na ovojnico vzdrževana konstantna kota Z_{Me} ; (3) zgolj podaljševanje trajanja zaustavitve oz. zagona agregatov ni dovolj učinkovit ukrep za zagotavljanje sprejemljivih maksimumov in minimumov gladin v kanalu. Z vidika varnosti, izkoristka energetskega potenciala in sistemske odzivnosti HE je smotrnejše, da se zaustavitev oz. zagon agregatov izvede s hitrejšim manevrom in s prilagojenim obratovanjem zapornic na gorvodnem koncu dovodnega kanala.

OZNAKE

Q_{ZL}	pretok skozi HE Zlatoličje [m^3/s]
Z_{Me}	kota gladine na gorvodnem koncu kanala, ob jezu Melje [m n.m.]
Z_{ZL}	kota gladine ob pregradi HE Zlatoličje [m n.m.]
NZ	normalna zaustavitev agregatov
HZ	hitra zaustavitev agregatov z aktiviranjem razbremenilnikov
n_G	Manningov koeficient hrapavosti [-]
l	padec dna kanala [-]

LITERATURA

- Colarič, O. Poročilo o modelnih raziskavah za hidrocentralo Srednja Drava 1 (strojnica z razbremenilcem). Ljubljana: Vodogradbeni laboratorij Ljubljana; 1964
- Colarič, O. Poročilo o rezultatih modelnih raziskav za hidroelektrarno Srednja Drava 1 (jez v Melju in dotočni kanal). Ljubljana: Vodogradbeni laboratorij Ljubljana; 1964
- Kiviniemi, O. in Makusa, G. 2009. A Scale Model Investigation of Free Surface Vortex With Particle Tracking Velocimetry – Master's Thesis. Lulea University of Technology: 104 str. (online) <http://epubl.ltu.se/1653-0187/2009/112/LTU-PB-EX-09112-SE.pdf> (pridobljeno 4.11.2013)
- Mlačnik, J. in Zakrajšek, M. Določitev ukrepov pri povečanju instalirane moči hidroelektrarne Zlatoličje. Ljubljana: Inštitut za hidravlične raziskave; 2004
- Taškov, C. Primerjava programov za račun obratovalnih valov v prizmatičnih trapeznih kanalih. Diplomsko naloga. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo; 2001
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (HEC) (online). Hydraulic Reference Manual. Version 4.1. January 2010. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx> (pridobljeno 4.9.2013)